

ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЗБАГАЧЕННЯ ҐРУНТУ УРБООКОСИСТЕМИ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ ВНАСЛІДОК ТРИВАЛОЇ ДІЇ АНТРОПОГЕННОГО ФАКТОРУ

Яковишина Т.Ф.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
пр. Дмитра Яворницького, 19, 49057, м. Дніпро
t_yakovyshyna@ukr.net

Євроінтеграція України передбачає наслідування EU Soil strategy та EU Action Plan «Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil», що вимагає приведення у відповідність системи оцінювання забруднення ґрунтів важкими металами до стандартів ЄС. Якість проведеного оцінювання вмісту забруднювачів надасть змогу вірно підібрати найбільш ефективні заходи з відновлення ґрунтів урбоєкосистем з високим рівнем антропогенного навантаження. Нерозуміння причини надлишкового вмісту сполук важких металів в ґрунті в подальшому призведе до прийняття помилкових рішень при розробці заходів з його ремедіації та ще більше підвищить рівень екологічної небезпеки для мешканців урбоєкосистем. Запропоновано залучати до системи оцінювання поелементного та поліелементного забруднення міських ґрунтів сполуками важких металів коефіцієнт збагачення, для чіткого розуміння антропогенного внеску в формування їх надлишкових кількостей з урахуванням особливостей конкретної території при визначенні рівня забруднення відносно зональних ґрунтів. Встановлено нестачу нікелю та рівень забруднення ґрунтів урбоєкосистеми м. Дніпро сполуками важких металів (Zn, Cu, Pb і Cd) за коефіцієнтом збагачення, відносно нормування до стабільного хімічного елементу (Al). Виявлено тенденцію зростання збагачення важкими металами міських ґрунтів в ряді $Cu > Zn > Pb > Cd > Ni$. Оцінено рівень збагачення ґрунтів урбоєкосистеми м. Дніпро сполуками важких металів в межах категорій від недостатньо до значно збагаченого, як за кожним досліджуваним важким металом, так і за їх сукупністю. Ґрунтовно доведено ефективність використання показників Er та MEQ при оцінюванні забруднення ґрунтів сполуками важких металів шляхом нормування із залученням стабільних елементів, яке надає можливість виділити вплив антропогенного фактору щодо причин їх накопичення порівняно до зональних ґрунтів. *Ключові слова:* важкі метали, забруднення, коефіцієнт збагачення, ґрунт, урбоєкосистема, екологічна небезпека, стабільний елемент.

Ecological assessment of the soil enrichment of the urban ecosystem by heavy metals due to the long-term effect of anthropogenic factor. Yakovyshyna T.

Ukraine's European integration involves following the EU Soil strategy and the EU Action Plan "Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil", which requires bringing the assessment system of soil pollution by heavy metals into line with EU standards. The assessment quality of the pollutants content makes it possible to correctly select the most effective measures for the restoration soils of urban ecosystems with a high level of anthropogenic load. Misunderstanding the cause of the excessive content of heavy metal compounds in the soil will subsequently lead to making erroneous decisions when developing measures for its remediation and will further increase the level of environmental danger for residents of urban ecosystems. The enrichment coefficient has been proposed to involve in the assessment system of elemental and polyelemental pollution of urban soils by heavy metal compounds, for a clear understanding of the anthropogenic contribution to the formation of their excess quantities, taking into account the characteristics of a specific territory when determining the level of pollution relative to zonal soils. The lack of nickel and the level of soils contamination by heavy metal compounds (Zn, Cu, Pb and Cd) for Dnipro urban ecosystem have been established with using of enrichment coefficient, relative to the standardization to a stable chemical element (Al). A trend of increasing enrichment of urban soils by heavy metals has been revealed in the series $Cu > Zn > Pb > Cd > Ni$. The soil enrichment level of Dnipro urban ecosystem by heavy metal compounds has been estimated within the categories from insufficient to significantly enriched, both for each studied heavy metal and for their totality. The effectiveness of using Er and MEQ indicators for assessment of soil contamination by heavy metal compounds by standardization with stable elements has been proposed for possibility to isolate the influence of the anthropogenic factor as the causes of their accumulation compared to zonal soils. *Key words:* metals, pollution, enrichment factor, soil, urban ecosystem, ecological hazard, stable element.

Постановка проблеми. Євроінтеграція України передбачає наслідування EU Soil strategy та EU Action Plan «Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil», що потребує приведення у відповідність системи оцінювання забруднення ґрунтів до стандартів ЄС. Існуюча система визначення рівня забруднення через нормування відносно фонові концентрації та ГДК має бути переглянута і уточнена шляхом залучення показників, які б надавали розуміння про причини надлишкових кількостей сполук важких металів в ґрунті та їх поведінку в певних ґрунтових

умовах. На відміну від гомогенних суміжних середовищ (вода, повітря) ґрунт, як неоднорідний складноорганізований, профільно-розподілений об'єкт, не може бути репрезентативно охарактеризований лише показником концентрації сполук важких металів в поверхневому шарі. Якість проведеного оцінювання вмісту забруднювачів надасть змогу вірно підібрати найбільш ефективні заходи з відновлення антропогенно навантажених ґрунтів урбоєкосистем.

Актуальність дослідження. Валовий вміст важких металів в ґрунтах визначається їх концентра-

цією в материнській породі. Породи збагачені важкими металами зумовлюють їх підвищений вміст в ґрунтах, що за умов невизначеності пов'язаної з відсутністю даних про ґрунотворну породу, може сприйматися як забруднення, хоча таким насправді не є, адже це пов'язано з природними процесами. Нерозуміння причини надлишкового вмісту сполук важких металів в ґрунті в подальшому призведе до прийняття помилкових рішень при розробці заходів з його ремедіації та ще більше підвищить рівень екологічної небезпеки для мешканців антропогенно навантажених територій урбоєкосистем. Тому досить важливо залучати до системи оцінювання поелементного та поліелементного забруднення міських ґрунтів сполуками важких металів показник, який би, надавав чітке розуміння антропогенного внеску в формування їх надлишкових кількостей з урахуванням особливостей конкретної території та давав змогу встановити рівень забруднення відносно зональних ґрунтів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження проведено у рамках реалізації Закону України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» (розпорядження Кабінету Міністрів України від 28.02.2019 р.); Стратегії екологічної безпеки та адаптації до змін клімату на період до 2023 р. (розпорядження Кабінету Міністрів України № 1363 від 20.10.2021 р.); під час виконання у Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» НДР «Інноваційні технології захисту довкілля для забезпечення екологічної безпеки техногенно-навантажених регіонів» (державний реєстраційний номер 0124U002506, 2024-2027 рр.).

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Найбільш поширеними при нормуванні поелементного забруднення ґрунту є показники, що базуються на фоновій концентрації – коефіцієнт забруднення (Cf), індекс геоаккумуляції (Igeo) та ГДК – коефіцієнт небезпеки ($K_{\text{нб}}$). До інтегрованих індексів на основі фонових або базових значень, відносяться: ступінь забруднення (Cd) та його модифікований варіант (mCd), індекс забруднення (PLI) та індекс забруднення Немерова (NPI).

Проте дослідженнями [1-2] встановлено, що результати оцінки забруднення ґрунтів сполуками важких металів в багатьох випадках виявляються дуже залежними від використаних референтних значень. Тільки коефіцієнт збагачення (enrichment factor – EF) [3-4] надає можливість диференціації елементів відносно їх вмісту, по-перше, як такого, що може бути зумовлений як результатом діяльності людини так і, навпаки, мати природне походження, а, по-друге, надає чітку відповідь щодо оцінки ступеня забруднення. Слід також враховувати направленість антропогенної діяльності в межах урбоєкосистеми, що впливає на вміст сполук важких металів в ґрунті,

а саме деконцентрація, пов'язана з процесом будівництва та забруднення зумовлене її функціонуванням. Тому для отримання більш точних результатів стану ґрунтів, що зазнали забруднення внаслідок тривалого антропогенного впливу виникає потреба в удосконаленні системи оцінювання, шляхом застосування комбінації одиничних та інтегрованих показників, які враховують особливості місця дослідження шляхом нормування відносно стабільних елементів (Al, Fe, Ca, Ti, Mn, Sc) [5-6].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Проблема дослідження полягає в обґрунтуванні ефективності використання в системі оцінювання екологічної небезпеки урбоєкосистем показників Ег – для елементного та MEQ – для поліелементного забруднення ґрунтів сполуками важких металів, як такого що забезпечує нормування за фоновією концентрацією відносно стабільного елементу та відбиває рівень їх збагачення порівняно до зонального ґрунту в результаті тривалого впливу антропогенного фактору.

Новизна. Встановлено рівень забруднення ґрунтів урбоєкосистеми м. Дніпро сполуками важких металів (Zn, Cu, Pb, Cd та Ni) за коефіцієнтом збагачення. Набуло подальшого розвитку застосування показників Ег та MEQ для оцінювання забруднення ґрунтів сполуками важких металів, як таких що завдяки нормуванню до стабільного елементу (Al) надають можливість виділити вплив антропогенного фактору щодо їх деконцентрації та накопичення відносно зональних ґрунтів, які знаходяться в нативних умовах.

Методологічне або загальнонаукове значення. Обґрунтування ефективності використання в системі оцінювання екологічної небезпеки урбоєкосистем показників Ег – для поелементного та MEQ – для поліелементного забруднення ґрунтів важкими металами проводили використовуючи базу даних вмісту Zn, Cu, Pb, Cd та Ni в ґрунтах урбоєкосистеми м. Дніпро [7]. Зональним ґрунтом виступав чорнозем звичайний малогумусний важкосуглинковий на лесі.

Для оцінювання збагаченості ґрунту використовували валовий вміст, як такий що відбиває всю кількість важких металів в ґрунті та зумовлюється їх наявністю в материнській породі – в нативних умовах, а також чітко показує надлишкову кількість, пов'язану з антропогенним фактором.

Коефіцієнт збагачення при оцінюванні елементного забруднення важкими металами розраховували згідно методики [8] за формулою (1)

$$EF = \frac{\left(\frac{C_n}{LV}\right)_{\text{зразок}}}{\left(\frac{GB}{LV}\right)_{\text{фон}}} \quad (1)$$

де $\left(\frac{C_n}{LV}\right)_{\text{зразок}}$ – відношення вмісту досліджуваного металу (C_n) до вмісту стабільного елементу (LV), як то Al, Fe, Ca, Ti, Mn, Sc [9];

(GB/LV)фон – фонове відношення вмісту досліджуваного металу (Cn) до вмісту стабільного елементу (LV), як то Al, Fe, Ca, Ti, Mn, Sc.

За стабільний елемент було обрано Al, він не надходить до ґрунтів урбоєкосистеми м. Дніпро з антропогенних джерел, отже його концентрація є відносно постійною. Процедура вибору відповідної концентрації Al для нормалізації в ґрунтах детально описана у G.F. Birch (2020) [10].

Прийому підвищення вмісту важкого металу в міських ґрунтах встановлювали відносно отриманих значень EF, а саме:

- від 0,05 до 1,5 – вміст важкого металу в ґрунті пов'язаний з природними процесами ґрунтоутворення і зумовлений наявністю в материнській породі;
- значення EF вище за 1,5 наголошують про антропогенний шлях підвищення вмісту важкого металу і свідчать про забруднення.

Для встановлення рівня забруднення ґрунту згідно значень коефіцієнту збагачення за кожним досліджуваним важким металом використовували наступну шкалу (табл. 1):

Таблиця 1

Нормування коефіцієнту збагачення за умов оцінювання поелементного забруднення ґрунту важкими металами

Значення EF	Рівень збагачення ґрунту
$EF < 2$	недостатньо збагачений
$2 \leq EF < 5$	помірно збагачений
$5 \leq EF < 20$	значно збагачений
$20 \leq EF < 40$	високо збагачений
$EF \geq 40$	надзвичайно високо збагачений

Таблиця 2

Нормування приведенного середнього коефіцієнту збагачення за умов поліелементного забруднення важкими металами ґрунту [6, 10]

MEQj	Рівень збагачення ґрунту
$MEQ_j < 1,5$	Незбагачений
$1,5 < MEQ_j < 3,0$	Незначно збагачений
$3,0 < MEQ_j < 5,0$	Помірно збагачений
$5,0 < MEQ_j < 10,0$	Значно збагачений
$MEQ_j > 10$	Високо збагачений

Середній коефіцієнт збагачення (MEQj) для поліелементних умов забруднення ґрунту важкими металами визначали за формулою (2) [10, 11] згідно нормування, наведеного в табл. 2.

$$MEQ_j = \frac{\sum_{i=1}^n EF_{ij}}{n} \quad (1)$$

Аналіз виборок значень коефіцієнтів збагачення по досліджуваним металам здійснювали методами математичної статистики [12].

Викладення основного матеріалу. Як показали результати досліджень рівень збагачення ґрунтів урбоєкосистеми м. Дніпро сполуками важких металів коливався в межах категорій від недостатньо до значно збагаченого, та змінювався в ряді: $Cu > Zn > Pb > Cd > Ni$ (табл. 3, рис. 1). Низьке збагачення ґрунтів нікелем пов'язане з природними процесами ґрунтоутворення, на які накладається стаціонально-деструктивне забруднення внаслідок будівництва при перемішуванні верхнього шару з підстилючими породами за умов відсутності антропогенного впливу. Менші значення середнього, ніж в медіани за всіма досліджуваними металами свідчили про наявність невеликих за територією, але потужних осередків забруднення, які мали прив'язку до існуючих та колишніх промислових зон. Значний розмах між максимальним і мінімальним значенням у коефіцієнтів збагачення Zn, Cu та Pb зумовлений тривалим впливом антропогенного фактору, а саме їх вмістом у викидах промислових підприємств, так, приміром, в правобережній частині міста південно-західна група підприємств бере свої витoki від «брянського заводу» (1887 р. заснування) має більш ніж столітню історію за умов збереження металургійного профілю до теперішнього часу. На промислову зону лівобережжя, пов'язану з колишнім заводом Шодуар (1899 р. заснування) накладається вплив залізничної товарної станції Нижньодніпровськ. Мінімальні значення EF знаходилися на одному рівні (0,17-0,28) у досліджуваних важких металів, зумовлювалися їх деконцентрацією внаслідок будівельної діяльності та територіально припадали на висотну забудову спальних районів міста, віддалених від промислових зон. Гостровершинне розподілення виборок збагачення ґрунтів Cu і Pb обумовлено строкатістю забруднення, в той час як відносно Zn вже сформувався урбанізований фон з окремими осередками hot spots. Правостороння асиметрія свідчила про антропогенний фактор підвищення валового вмісту важких металів (Cu, Zn, Pb, Cd) в ґрунтах урбоєкосистеми м. Дніпро.

Використання MEQ надало змогу оцінити поліелементний характер забруднення міських ґрунтів відносно збагаченості сполуками важких металів, (табл. 4, рис. 1). Найбільший внесок в збагачення ґрунтів сполуками важких металів спричиняли Cu, Zn та Pb, що зумовлювалось переважаючим впливом викидів промислових підприємств порівняно з викидами автотранспорту за виключенням центральної частини міста. Антропогенний фактор підвищення вмісту сполук важких металів позначався на ділянках відбору проб, що припадали до категорій незначно збагаченого ґрунту і вище.

Головні висновки. Встановлено нестачу нікелю та рівень забруднення ґрунтів урбоєкосистеми м. Дніпро сполуками важких металів (Zn, Cu, Pb і Cd) за коефіцієнтом збагачення, відносно нормування до стабільного хімічного елементу (Al).

Таблиця 3

Статистична характеристика виборок коефіцієнтів збагачення Zn, Cu, Pb, Cd, та Ni ґрунтів урбоекосистеми м. Дніпро за умов елементного характеру впливу

Показник	Коефіцієнт збагачення				
	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni
Мінімум	0,17	0,28	0,22	0,25	0,20
Максимум	19,78	17,60	13,94	3,07	1,69
Середнє	1,58	5,34	2,14	1,09	0,69
Медіана	9,98	8,94	7,08	1,66	0,95
Екссес	45,31	0,11	7,70	2,20	2,05
Асиметрія	6,28	0,99	2,90	1,04	0,87
Дисперсія	6,15	18,82	8,52	0,28	0,07
Стандартне відхилення	2,50	4,37	2,94	0,53	0,27
Розмах	19,61	17,31	13,72	2,82	1,49

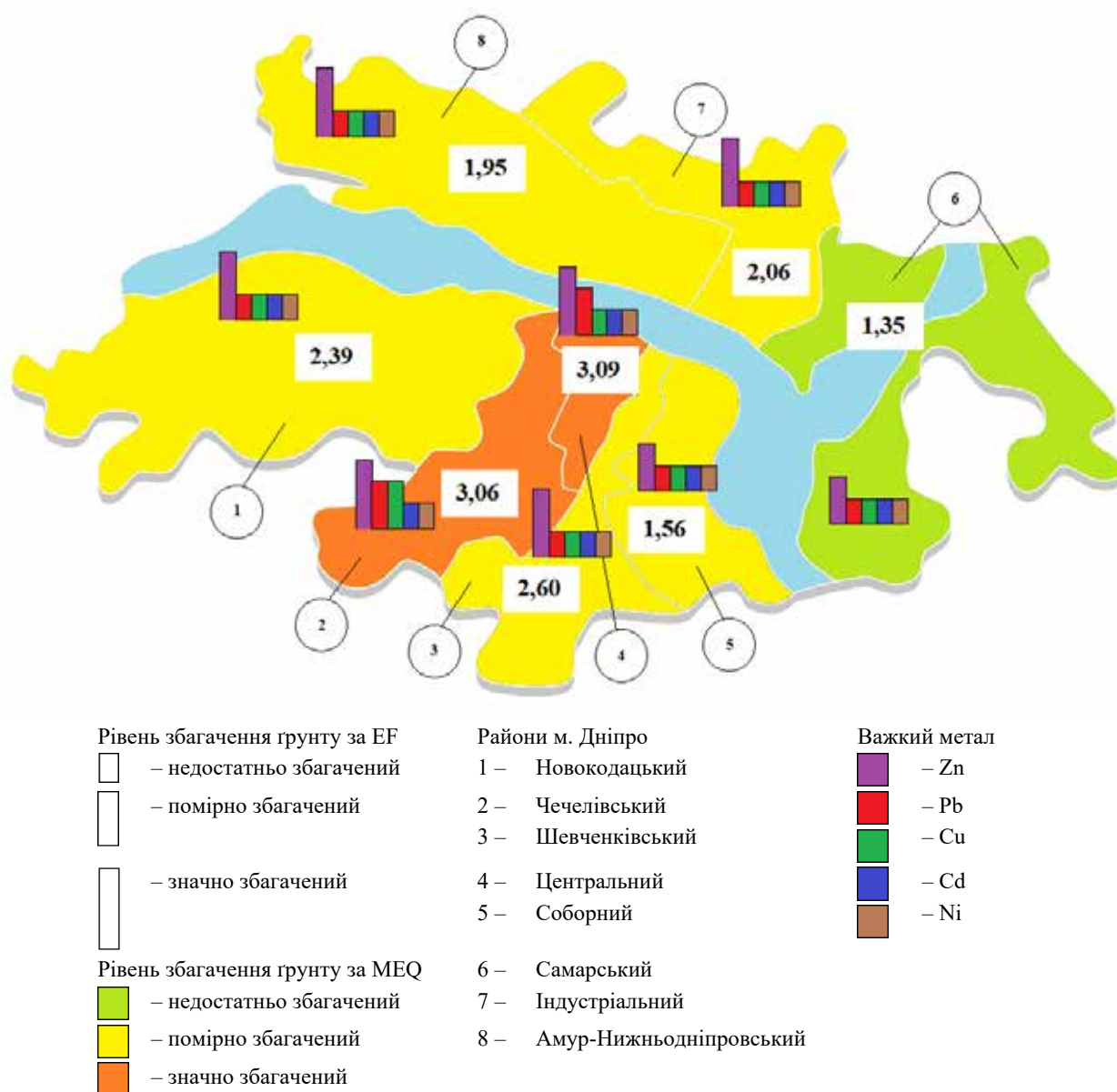


Рис. 1. Збагачення ґрунту важкими металами за середніми значеннями EF та MEQ по районам м. Дніпро

Таблиця 4

**Збагачення ґрунтів урбоєкосистеми м. Дніпро важкими металами
з урахуванням поліелементного характеру впливу**

Адміністративна одиниця	Рівень збагачення ґрунту за МEQ			
	незбагачений	незначно збагачений	помірно збагачений	значно збагачений
Амур-Нижньодніпровський район	<u>0,78 (0,44-1,28)</u> 7	<u>2,10 (1,52-2,80)</u> 4	<u>4,16</u> 1	<u>6,90</u> 1
Індустріальний район	<u>0,73 (0,62-0,84)</u> 2	<u>1,74</u> 1	<u>3,54 (3,12-3,96)</u> 2	-
Новокодацький район	<u>1,17 (1,04-1,37)</u> 6	<u>2,42 (1,51-2,92)</u> 3	<u>3,92 (3,13-4,70)</u> 2	<u>6,55</u> 1
Самарський район	<u>0,81 (0,54-1,05)</u> 5	<u>1,71(1,58-1,83)</u> 2	<u>3,35</u> 1	
Соборний район	<u>0,81 (0,30-1,15)</u> 4	<u>2,31 (2,11-2,63)</u> 4		
Центральний район	<u>1,39</u> 1	<u>2,49</u> 1		<u>5,09</u> 1
Чечелівський район	<u>1,32 (1,15-1,48)</u> 2	<u>2,06 (1,60-2,31)</u> 3	<u>4,13 (3,60-4,74)</u> 3	<u>5,44</u> 1
Шевченківський район	<u>1,09 (0,89-1,29)</u> 2	<u>2,50 (2,02-2,97)</u> 2	<u>3,67 (3,11-4,15)</u> 3	
Лівобережжя	<u>0,78 (0,44-1,28)</u> 14	<u>1,72 (1,52-2,80)</u> 5	<u>3,62 (3,12-4,16)</u> 6	<u>6,90</u> 1
Правобережжя	<u>1,18 (0,30-1,48)</u> 14	<u>2,32 (1,51-2,97)</u> 13	<u>3,90 (3,11-4,74)</u> 8	<u>5,69 (5,09-6,55)</u> 3
м. Дніпро	<u>0,98 (0,30-1,48)</u> 28	<u>2,15 (1,51-2,97)</u> 18	<u>3,62 (3,11-4,74)</u> 14	<u>6,00 (5,09-6,90)</u> 4

Примітка: чисельник – середнє значення та в дужках межі коливань в ґрунтах відповідної категорії збагачення; знаменник – кількість ключових ділянок відбору проб ґрунту.

Виявлено тенденцію зростання збагачення важкими металами міських ґрунтів в ряді $Cu > Zn > Pb > Cd > Ni$. Оцінено рівень збагачення ґрунтів урбоєкосистеми м. Дніпро сполуками важких металів в межах категорій від недостатньо до значно збагаченого, як за кожним досліджуваним важким металом, так і за їх сукупністю. Ґрунтовно доведено ефективність використання показників E_r та МEQ при оцінюванні забруднення ґрунтів сполуками важких металів внаслідок особливостей нормування із залученням стабільних елементів, яке надає можливість виді-

лити вплив антропогенного фактору щодо причин їх накопичення порівняно до зональних ґрунтів.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати досліджень можуть бути використані для обґрунтування залучення показників збагачення ґрунту важкими металами – E_r та МEQ до блоку оцінювання при удосконаленні системи моніторингу урбоєкосистем, що зазнали тривалого різнонаправленого масштабного впливу антропогенної діяльності при їх розбудові і функціонуванні.

Література

1. Kowalska J.B., Mazurek R., Gąsiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination – a review. *Environmental Geochemistry and Health*. 2018. Vol. 40. P. 2395-2420. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0106-z>
2. Maanan M., Saddik M., Maanan M., Chaibi M. Environmental and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Nador lagoon, Morocco. *Ecol Indic*. 2015. Vol. 48. P. 616-626.
3. Sojka M., Choinski A., Ptak M., Siepak M. Causes of variations of trace and rare earth elements concentration in lake bottoms sediments in the Bory Tucholskie National Park, Poland. 2021. *Scientific Reports*. Vol. 11. P.1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80137-z>
4. Zhou Y., Gao L., Xu D., Gao B. Geochemical baseline establishment, environmental impact and health risk assessment of vanadium in lake sediments, China. *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 660. P. 1338–1345. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.093>
5. Saddik M., Fadili A., Makan A. Assessment of heavy metal contamination in surface sediments along the Mediterranean coast of Morocco. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2019. Vol.191. doi:10.1007/s10661-019-7332-4

6. Carrillo K.C., Rodríguez-Romero A., Tovar-Sanchez A., Ruiz-Gutiérrez G., Viguri Fuente J.R. Geochemical baseline establishment, contamination level and ecological risk assessment of metals and As in the Limoncocha lagoon sediments, Ecuadorian Amazon region. *Journal of Soils and Sediments*. 2022. Vol.22. P.293–315. doi:10.1007/s11368-021-03084-w
7. Яковишина Т. Ф. Розвиток наукових основ удосконалення системи моніторингу мігрування небезпечних сполук металів в ґрунтах урбоекосистем. дис. док. техн. наук: 21.06.01. Дніпро, 2019. 479 с.
8. Teng Y., Ni S., Wang J., Niu L. Geochemical baseline of traceelements in the sediment in Dexing area, South China. *Environmental Geology*. 2009. Vol. 57 P. 1649–1660. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1446-2>
9. Wei C., Wen H., Geochemical baselines of heavy metals in thesediments of two large freshwater lakes in China: implications forcontamination character and history. *Environmental Geochemistry and Health*2012. Vol. 34. P. 737–748. <https://doi.org/10.1007/s10653-012-9492-9>
10. Birch G.F., Olmos M.A. Sediment-bound heavy metals as indicators of human influence and biological risk in coastal water bodies. *ICES Journal of Marine Science*. 2008. Vol. 65(8). doi:10.1093/icesjms/fsn139
11. Mekky H.S., Abou El-Anwar E.A., Salman S.A., Elnazer A.A., Abdel Wahab W., Asmoay A.S. Evaluation of heavy metals pollution by using pollution indices in the soil of Assiut District, Egypt. *Egyptian Journal of Chemistry*. 2019. Vol. 62, No. 9. pp. 1673–1683.
12. Тарасова В.В. Екологічна статистика. Київ: Центр уч. літератури, 2008. 392 с.